

ÍNDICE DE QUALIDADE DO SOLO E ÍNDICE DE PERCEPÇÃO EM SISTEMAS HORTÍCOLAS FAMILIARES: UMA ANÁLISE QUALI- QUANTITATIVA

SOIL QUALITY INDEX AND PERCEPTION INDEX IN FAMILY
HORTICULTURAL SYSTEMS: A QUALI-QUANTITATIVE ANALYSIS

Ciências Agrárias • 07/04/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/775521226](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/775521226)

Ana Letícia Gonçalves Oliveira¹

Fabício Pelizer Almeida²

Harielly Marianne Costa Marques³

RESUMO

O presente estudo avaliou a qualidade do solo em sistemas de horticultura familiar no Triângulo Mineiro por meio de abordagem quali-quantitativa. O objetivo foi comparar manejos conservacionista e convencional, integrar indicadores físicos, químicos e biológicos a percepções de agricultores e verificar a convergência entre resultados laboratoriais e saber local. O delineamento contemplou amostragens em duas profundidades (0–10 e 10–20 cm) em propriedades de Uberlândia, Araguari e Indianópolis. Foram determinadas a densidade e porosidade do solo, pH em CaCl_2 , matéria orgânica, capacidade de troca catiônica e respiração basal. Paralelamente, aplicaram-se entrevistas semiestruturadas e escalas Likert (compactação, infiltração, correção, erosão e estabilidade produtiva), com codificação temática. Os indicadores foram integrados no Soil Quality Index (SQI) por padronização (*z-score*) e combinação por domínios; as percepções compuseram o Índice de Percepção (IPER). As análises (ANOVA/Mann-Whitney; tamanhos de efeito; Spearman) mostraram menor densidade e maior porosidade, matéria orgânica, CTC e atividade microbiana no manejo conservacionista. O SQI foi positivo no conservacionista e negativo no convencional, enquanto o IPER indicou percepções favoráveis no primeiro e desfavoráveis no segundo. Observou-se correlação forte entre SQI e IPER, sugerindo que melhorias técnicas na qualidade do solo são reconhecidas pelos agricultores como maior infiltração, menor erosão, menor necessidade de correção e maior estabilidade produtiva. Conclui-se que práticas conservacionistas constituem estratégia efetiva para elevar a qualidade do solo e a resiliência produtiva em sistemas hortícolas familiares, e que a integração de métricas objetivas e percepções locais é adequada para monitoramento e suporte à decisão.

Palavras-chave: agricultura familiar. extensão rural. manejo sustentável do solo. pesquisa quali-quantitativa.

ABSTRACT

This study evaluated soil quality in family horticultural systems in the Triângulo Mineiro region through a quali-quantitative approach. The objective was to compare conservationist and conventional management systems, integrate physical, chemical, and biological indicators with farmers' perceptions, and verify the convergence between laboratory results and local knowledge. The study design included soil sampling at two depths (0–10 and 10–20 cm) on farms located in Uberlândia, Araguari, and Indianópolis. Soil bulk density and porosity, pH in CaCl₂, organic matter, cation exchange capacity, and basal respiration were determined. In parallel, semi-structured interviews and Likert scales were applied to assess perceptions related to compaction, infiltration, soil amendment requirements, erosion, and production stability, followed by thematic coding. The indicators were integrated into the Soil Quality Index (SQI) through standardization (z-score) and domain-based aggregation, while perceptions were synthesized into the Perception Index (IPER). Statistical analyses (ANOVA/Mann–Whitney, effect sizes, and Spearman correlation) showed lower bulk density and higher porosity, organic matter, cation exchange capacity, and microbial activity under conservationist management. The SQI was positive in the conservationist system and negative in the conventional one, whereas the IPER indicated favorable perceptions in the former and unfavorable perceptions in the latter. A strong correlation was observed between SQI and IPER, suggesting that farmers recognize technical improvements in soil quality as greater infiltration, lower erosion, reduced need for correction, and higher production stability. It has concluded that conservationist practices constitute an

effective strategy to improve soil quality and productive resilience in family horticultural systems, and that the integration of objective metrics and local perceptions is suitable for monitoring and decision support.

Keywords: family farming. rural extension. sustainable soil management. quali-quantitative research.

1. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo ocupa posição central no debate contemporâneo sobre sustentabilidade agrícola, sobretudo em sistemas produtivos intensivos e dependentes de elevada regularidade funcional dos atributos edáficos. Em sua formulação clássica, Doran & Parkin (1994) definem a qualidade do solo como a capacidade desse recurso de desempenhar funções ecológicas e produtivas essenciais, entre elas sustentar a produtividade biológica, regular o fluxo de água, promover ciclagem de nutrientes e manter atividade biológica compatível com a estabilidade do ecossistema. Tal formulação desloca a análise do solo de uma leitura restrita à fertilidade química para uma compreensão funcional, sistêmica e relacional, na qual atributos físicos, químicos e biológicos devem ser interpretados de forma integrada.

Essa perspectiva é particularmente relevante em sistemas hortícolas familiares, nos quais a intensidade de uso da terra, a sucessão frequente de cultivos, o preparo recorrente do solo e a elevada exigência nutricional das culturas tendem a impor perturbações contínuas à estrutura edáfica, à dinâmica da matéria orgânica e à atividade microbiana (BARRETO et al., 2021) Nessas condições, a qualidade do solo deixa de ser variável secundária e passa a constituir elemento estruturante da estabilidade produtiva, da

eficiência do uso de insumos e da resiliência do agroecossistema. Em áreas submetidas a manejo intensivo, a degradação progressiva de atributos como densidade, porosidade, teor de matéria orgânica e capacidade de troca catiônica pode comprometer a infiltração de água, a expansão radicular, a retenção de nutrientes e, em última instância, a sustentabilidade técnica e econômica da produção (BEDOLLA-RIVERA et al., 2023)

No Triângulo Mineiro, essa problemática assume contornos ainda mais específicos em razão das características pedológicas regionais. Há, portanto, predominância de solos fortemente intemperizados, com mineralogia dominada por óxidos de ferro e alumínio, baixa atividade da fração argila e reduzida reserva natural de bases, como descrito no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SANTOS et al., 2018). Em tais condições, a matéria orgânica exerce papel decisivo na agregação, na estabilidade estrutural, na retenção hídrica e na regulação da fertilidade (ALVAREZ-SÁNCHEZ et al., 2020). Por isso, práticas que intensificam o revolvimento, expõem o solo e reduzem o aporte de resíduos orgânicos tendem a ampliar a vulnerabilidade física e química desses sistemas, especialmente em unidades produtivas familiares que operam com margens técnicas e econômicas mais estreitas.

A literatura tem demonstrado que práticas conservacionistas, a exemplo da adubação orgânica, da cobertura vegetal e da diversificação de espécies, favorecem a manutenção ou a recuperação de atributos edáficos associados à funcionalidade do solo. Estudos apontam incremento de biomassa microbiana, melhoria da estabilidade estrutural, aumento do teor de matéria orgânica e maior equilíbrio nas propriedades químicas em sistemas com menor grau de perturbação antrópica (MARCHI et al., 2008;

ALTIERI & NICHOLLS, 2020). Entretanto, a magnitude dessas respostas não é universal nem automaticamente transferível entre contextos, pois depende da interação entre clima, solo, histórico de uso e intensidade do manejo. Isso torna indispensável a produção de evidências situadas, particularmente em sistemas hortícolas familiares do Cerrado mineiro, ainda pouco explorados sob abordagem integrada.

Além disso, o diagnóstico da qualidade do solo não se esgota na mensuração instrumental de atributos laboratoriais. O manejo cotidiano nas propriedades familiares é também orientado por formas empíricas de leitura do ambiente edáfico, construídas a partir da observação recorrente de elementos como infiltração, friabilidade, coloração, resposta das culturas, necessidade de correções e ocorrência de erosão. Conforme argumentam Toledo & Barrera-Bassols (2008), o conhecimento local constitui sistema interpretativo próprio, com racionalidade prática e lastro ecológico, capaz de oferecer chaves relevantes para a compreensão do funcionamento dos agroecossistemas. Em vez de ser tomado como contraponto à análise técnica, esse repertório pode operar como dimensão complementar de validação, contextualização e aplicabilidade dos resultados científicos.

Nesse quadro, emerge a seguinte questão de pesquisa: em que medida a avaliação integrada de indicadores físicos, químicos e biológicos do solo, associada à percepção dos agricultores, permite discriminar diferenças de qualidade do solo entre sistemas hortícolas familiares sob manejo conservacionista e convencional no Triângulo Mineiro? A formulação dessa questão decorre de uma lacuna ainda presente na literatura regional: embora exista base conceitual robusta para o uso de indicadores integrados de

qualidade do solo, sua aplicação em horticultura familiar no Cerrado mineiro permanece limitada, sobretudo quando articulada à dimensão sociocognitiva do manejo agrícola.

A justificativa do estudo, portanto, reside em três planos complementares. No plano científico, contribui para o avanço de abordagens integradoras de qualidade do solo em contexto pedológico e produtivo específico. No plano metodológico, propõe a articulação entre métricas objetivas e percepção local, ampliando a densidade interpretativa do diagnóstico. No plano aplicado, oferece subsídios para assistência técnica, extensão rural e formulação de estratégias de manejo mais coerentes com a sustentabilidade da horticultura familiar regional. Trata-se, ainda, de uma agenda alinhada à discussão mais ampla sobre agricultura sustentável, conservação do solo e fortalecimento de sistemas produtivos familiares.

Neste sentido, o objetivo geral deste estudo foi avaliar comparativamente a qualidade do solo em sistemas de horticultura familiar no Triângulo Mineiro, integrando indicadores físicos, químicos e biológicos a métricas de percepção dos agricultores sob práticas de manejo conservacionista e convencional. Especificamente, buscou-se: a) analisar o comportamento de atributos edáficos representativos de diferentes domínios funcionais do solo; b) comparar o desempenho desses atributos entre os dois tipos de manejo; c) sistematizar a percepção dos agricultores quanto à condição e ao funcionamento do solo; e d) examinar a correspondência entre os resultados laboratoriais e a experiência prática dos produtores.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Qualidade do Solo Como Conceito Funcional e Sistêmico

A consolidação do conceito de qualidade do solo representou mudança substantiva no modo de interpretar os sistemas edáficos no âmbito das ciências agrárias. Até a segunda metade do século XX, a avaliação do solo esteve fortemente vinculada à produtividade agrônômica imediata e, de forma mais estreita, à disponibilidade de nutrientes (BÜNEMANN et al., 2018). A partir da incorporação de uma perspectiva ecológica mais abrangente, o solo passou a ser compreendido como sistema vivo, dinâmico e multifuncional, cuja relevância extrapola a sustentação física das plantas e o suprimento químico de elementos essenciais. Doran & Parkin (1994) foram decisivos nesse deslocamento ao afirmar que a qualidade do solo deve ser avaliada pela sua capacidade de funcionar dentro dos limites do ecossistema, sustentando produtividade, preservando a qualidade ambiental e promovendo a saúde de plantas, animais e seres humanos.

Esse entendimento foi aprofundado por Karlen et al. (1997), ao enfatizarem que a qualidade do solo não pode ser inferida por um atributo isolado, justamente porque os processos físicos, químicos e biológicos operam de forma interdependente. A densidade do solo, por exemplo, não se explica apenas por condições mecânicas; ela resulta também da presença de matéria orgânica, da estabilidade de agregados, da atividade radicular e biológica, do regime hídrico e do histórico de manejo. De modo semelhante, a capacidade de troca catiônica, embora classicamente interpretada como atributo químico, depende em ambientes tropicais da contribuição da matéria orgânica e da natureza mineralógica do solo. O conceito de qualidade do solo, assim, adquire natureza sistêmica: sua

interpretação exige leitura articulada dos domínios edáficos, e não a simples soma de variáveis desconectadas.

Essa formulação possui implicações metodológicas relevantes. Se a qualidade do solo é expressão de funcionalidade integrada, então sua avaliação requer indicadores capazes de captar diferentes dimensões do sistema e, ao mesmo tempo, permitir interpretação relacional entre elas. Não se trata apenas de aumentar o número de variáveis analisadas, mas de construir um referencial analítico que expresse coerência funcional. É precisamente nesse ponto que emergem os índices de qualidade do solo, concebidos como instrumentos para integrar múltiplos atributos em uma base comum de comparação.

2.2. Intensificação dos Sistemas de Horticultura e Vulnerabilidade Edáfica

Em sistemas hortícolas, a discussão sobre qualidade do solo assume caráter ainda mais crítico. Diferentemente de cultivos extensivos com janelas maiores de recomposição biológica e estrutural, a horticultura costuma envolver sucessões rápidas, frequente trânsito de máquinas e pessoas, elevada exportação de nutrientes, mobilização constante do solo e necessidade contínua de manutenção de condições físicas adequadas para germinação, emergência, enraizamento e colheita. Tais características fazem com que pequenas alterações em atributos edáficos repercutam rapidamente no desempenho agrônomo e econômico das unidades produtivas (BEDOLLA-RIVERA et al., 2023)

Em Lal (2015) observa-se que a redução dos estoques de carbono orgânico do solo constitui um dos principais vetores da degradação

em agroecossistemas intensivos. A perda de carbono compromete a agregação, reduz a porosidade, limita a infiltração de água, eleva a suscetibilidade à compactação e enfraquece a atividade microbiana responsável pela decomposição e ciclagem de nutrientes. Em ambientes tropicais, esse processo tende a ser acelerado pela elevada taxa de mineralização da matéria orgânica, sobretudo quando associada ao revolvimento frequente e à exposição do solo. Nessas condições, a produtividade passa a depender crescentemente de correções externas, ampliando custos e fragilizando a sustentabilidade do sistema.

No caso da horticultura familiar, a intensificação não pode ser analisada apenas em chave técnica; ela precisa ser compreendida também como resposta econômica e organizacional. A necessidade de abastecimento contínuo de mercados locais, feiras e programas institucionais frequentemente leva à redução do tempo de pousio, à simplificação de rotações e à exploração intensiva dos canteiros. Quando essas estratégias não vêm acompanhadas de práticas de conservação, o solo passa a operar sob regime de exaustão funcional. A degradação, portanto, não se manifesta apenas como queda de fertilidade, mas como perda de capacidade de autorregulação do sistema edáfico.

A pertinência da análise da qualidade do solo no Triângulo Mineiro decorre também do próprio substrato pedológico regional. Os solos dominantes do Cerrado brasileiro, em especial Latossolos e Argissolos, apresentam alto grau de intemperismo, predomínio de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, baixa atividade da fração argila e reduzida disponibilidade natural de bases (SANTOS et al., 2018). Embora muitos desses solos possuam boa profundidade e estrutura

originalmente favorável, sua manutenção sob uso agrícola intensivo depende fortemente do manejo.

Em termos práticos, isso significa que a estabilidade estrutural e parte relevante da fertilidade funcional desses solos ficam fortemente condicionadas ao teor e à qualidade da matéria orgânica. Esta atua como agente cimentante de agregados, modulador da retenção hídrica, reserva de nutrientes e suporte à atividade biológica (WU et al., 2024) Em áreas hortícolas familiares, onde o preparo repetitivo do solo pode ser recorrente, a rápida oxidação da matéria orgânica compromete esse equilíbrio e amplia a ocorrência de adensamento superficial, selamento, escoamento e erosão. Assim, o problema da qualidade do solo no Cerrado mineiro não é apenas quantitativo, mas qualitativo: trata-se de preservar os mecanismos que permitem a esses solos responderem funcionalmente ao uso agrícola.

Esse ponto é central para o estudo em questão. Em regiões de solos menos intemperizados, determinados atributos podem responder de forma mais resiliente ao manejo intensivo. Já no Cerrado, a baixa reserva mineral e a forte dependência da matéria orgânica tornam o sistema mais sensível a práticas que reduzam cobertura, diversidade e aporte de resíduos. A análise da qualidade do solo em horticultura familiar nesse contexto, portanto, demanda abordagem teoricamente consistente e metodologicamente sensível às especificidades edafoclimáticas regionais.

2.3. Funcionalidade do Sistema Edáfico e Indicadores de Qualidade do Solo

A literatura agronômica tem reiterado que práticas conservacionistas representam um dos principais caminhos para a manutenção da funcionalidade do solo em sistemas intensivos. A incorporação de resíduos orgânicos, o uso de coberturas vegetais, a rotação e diversificação de culturas, bem como a redução do revolvimento, compõem um conjunto de estratégias voltadas à proteção física do solo e à reativação de seus ciclos biogeoquímicos (KUMAR & SINGH, 2023). O estudo de Marchi et al., (2008) demonstra que a adubação orgânica e a cobertura do solo contribuem para elevar o teor de matéria orgânica, melhorar a estrutura e favorecer a atividade biológica em sistemas hortícolas. Esses efeitos não são marginais: eles incidem diretamente sobre a capacidade do solo de infiltrar água, armazenar nutrientes e sustentar o desenvolvimento radicular.

Para Altieri & Nicholls (2020), sob a perspectiva agroecológica, a sustentabilidade dos agroecossistemas depende da intensificação de processos ecológicos internos, e não da crescente substituição desses processos por insumos externos. Em outras palavras, sistemas mais diversos e biologicamente ativos tendem a apresentar maior autorregulação, melhor eficiência no uso de recursos e maior resiliência diante de perturbações. O solo, nesse arranjo, não é mero suporte inerte, mas núcleo de articulação entre matéria orgânica, biodiversidade, água e produtividade. Sob essa ótica, práticas conservacionistas assumem valor não apenas corretivo, mas estruturante.

Entretanto, a literatura também indica que os efeitos dessas práticas não são uniformes. A resposta do solo depende do tempo de adoção, da intensidade do manejo anterior, da textura, da mineralogia, do regime hídrico e da composição dos resíduos

aplicados. Essa heterogeneidade reforça a necessidade de estudos localizados e comparativos, capazes de mostrar como tais práticas se expressam em contextos específicos. É nesse ponto que a pesquisa regional em horticultura familiar ganha relevância, ao produzir evidências ajustadas às condições reais de uso da terra e às estratégias concretas de manejo (SHARMA et al., 2025).

A construção de índices compostos de qualidade do solo decorre da própria natureza multidimensional do conceito. Karlen et al. (1997) argumentam que, para além da análise individual de atributos, é necessário dispor de mecanismos que permitam integrar variáveis de diferentes domínios em um referencial comum. Tais índices cumprem dupla função: reduzem a complexidade analítica sem eliminar a informação essencial, e tornam possível a comparação entre sistemas de manejo distintos a partir de uma métrica sintética que expressa o desempenho global do solo.

Contudo, a utilidade de um índice não reside apenas em sua capacidade de resumir dados. Seu valor analítico depende da coerência entre os indicadores escolhidos, da forma de padronização, do sentido interpretativo atribuído a cada variável e do modelo de agregação empregado. Um índice bem construído deve preservar a lógica funcional do sistema edáfico, permitindo que a leitura sintética continue ancorada em processos reais. Em sistemas agrícolas intensivos, essa abordagem é especialmente útil porque intervenções de manejo podem produzir respostas assimétricas: melhora pontual em determinado atributo químico pode coexistir com degradação estrutural e declínio da atividade biológica. Sem integração analítica, tais assimetrias tendem a gerar diagnósticos parciais ou excessivamente otimistas.

Nesse sentido, a adoção de um índice de qualidade do solo para sistemas hortícolas familiares do Triângulo Mineiro permite examinar se os diferentes componentes do sistema estão respondendo de forma convergente ao manejo e se essa convergência pode ser interpretada como melhoria efetiva da qualidade edáfica. A leitura integrada, portanto, é condição para evitar reducionismos e sustentar comparações robustas entre sistemas conservacionistas e convencionais.

A incorporação da percepção dos agricultores ao estudo da qualidade do solo insere a análise em um campo mais amplo, no qual a produção de conhecimento não se limita aos procedimentos laboratoriais. Para Toledo & Barrera-Bassols (2008) o conhecimento camponês e tradicional sobre o solo constitui sistema complexo de classificação, observação e decisão, construído historicamente em interação com o ambiente. Esse saber se expressa em categorias práticas ligadas à cor, textura, friabilidade, umidade, capacidade de infiltração, resposta da cultura e esforço exigido no manejo. Embora não se organize segundo a linguagem técnico-científica formal, ele produz interpretações consistentes sobre o estado funcional do solo.

No contexto da horticultura familiar, essa dimensão é especialmente relevante, porque o agricultor acompanha cotidianamente os efeitos do manejo sobre a produção, a necessidade de correções, o comportamento da água e a estabilidade dos canteiros. Sua percepção não substitui a mensuração instrumental, mas oferece parâmetro de realidade que pode confirmar, tensionar ou qualificar os resultados analíticos. Quando há convergência entre indicadores laboratoriais e percepção local, o diagnóstico ganha robustez e legitimidade, porém, quando há divergência, abrem-se possibilidades interpretativas igualmente relevantes, seja por

limitações dos indicadores escolhidos, seja por temporalidades distintas entre mudança biofísica e percepção prática.

Sob perspectiva metodológica, a articulação entre dados quantitativos e percepção dos agricultores favorece abordagens quali-quantitativas mais densas, capazes de integrar objetividade analítica e inteligibilidade social do fenômeno estudado. Em vez de tratar o agricultor apenas como informante periférico, essa abordagem o reposiciona como sujeito interpretante do sistema produtivo.

3. METODOLOGIA

3.1. Seleção de Propriedades Rurais, Amostragem de Solo e Análises Físico-químicas e Biológicas

O estudo foi conduzido em propriedades de agricultores familiares localizadas no Triângulo Mineiro, região marcada pela diversidade produtiva e pela forte presença da horticultura no abastecimento local. Foram selecionados os municípios de Uberlândia, Araguari e Indianópolis, reconhecidos pela expressiva produção de hortaliças como alface (*Lactuca sativa*), couve (*Brassica oleracea* var. *acephala*), cenoura (*Daucus carota*) e beterraba (*Beta vulgaris*), cultivos que desempenham papel relevante tanto na segurança alimentar quanto na geração de renda.

As propriedades incluídas no estudo foram selecionadas por amostragem intencional, com base em critérios previamente definidos: (i) cultivo contínuo de hortaliças por um período mínimo de três anos; (ii) adoção predominante de manejo convencional ou conservacionista; (iii) área mínima de 0,5 hectares em produção ativa; e (iv) anuência formal do agricultor para participação na

pesquisa. Para fins de categorização, o manejo convencional foi definido pelo uso intensivo de insumos químicos e preparo frequente do solo, enquanto o manejo conservacionista englobou a utilização de adubação orgânica, rotação de culturas e emprego de coberturas vegetais. A opção por comparar esses dois sistemas segue a orientação metodológica de Karlen et al. (1997), que defendem análises contrastivas como estratégia eficaz para identificar indicadores sensíveis da qualidade do solo.

As coletas de solo foram realizadas em dois talhões de cada propriedade, o que resultou em um total de doze unidades amostrais, distribuídas de forma equilibrada entre os sistemas de manejo convencional e conservacionista (seis unidades por sistema). Em cada talhão, foram extraídas amostras compostas em duas profundidades padronizadas, 0-10 cm e 10-20 cm, seguindo rigorosamente os procedimentos recomendados pela Embrapa para amostragem de solos (DONAGEMMA et al., 2011).

A adoção desse protocolo permitiu contemplar a camada superficial mais sensível ao manejo hortícola, e a subsuperficial, frequentemente utilizada como indicador de redistribuição vertical de nutrientes e de alterações estruturais. Ao final, obtiveram-se 24 amostras para cada sistema de manejo, assegurando número adequado de repetições para análises comparativas.

A caracterização do solo contemplou indicadores físicos, químicos e biológicos selecionados por sua reconhecida sensibilidade às práticas de manejo. Entre os indicadores físicos, determinaram-se a densidade do solo, pelo método do anel volumétrico, e a porosidade total. A avaliação química incluiu a determinação do pH em CaCl_2 , o

teor de matéria orgânica pelo método Walkley-Black e a capacidade de troca catiônica.

Para os indicadores biológicos, mensurou-se a respiração basal do solo, estimada a partir da evolução de CO₂ capturado em solução de NaOH, conforme Anderson e Domsch (1990), e a biomassa microbiana de carbono, obtida pelo método da fumigação-extração, seguindo Vance, Brookes e Jenkinson (1987). A seleção desses parâmetros fundamentou-se em sua capacidade de refletir modificações induzidas pelo manejo agrícola, além de representarem dimensões consolidadas no arcabouço conceitual da qualidade do solo proposto por Doran e Parkin (1994).

3.2. Pesquisa Qualitativa Estruturada e Integração de Modelos

A etapa qualitativa baseou-se na realização de entrevistas semiestruturadas com os agricultores, orientadas para captar percepções referentes à fertilidade, estrutura do solo, capacidade de infiltração, ocorrência de erosão e custos associados aos insumos utilizados no manejo. Para complementar essas informações, aplicou-se um conjunto de escalas do *tipo Likert*, variando de 1 a 5, por meio das quais foram avaliadas percepções relativas à compactação, infiltração de água, necessidade de correção química e estabilidade produtiva.

As narrativas obtidas nas entrevistas foram submetidas a um processo de codificação temática inspirado em Toledo e Barrera-Bassols (2008), permitindo organizar as falas em categorias analíticas que posteriormente foram convertidas em variáveis binárias (presença ou ausência de determinados conteúdos). Essa estratégia possibilitou integrar dimensões qualitativas ao conjunto

de dados quantitativos, preservando nuances interpretativas e garantindo a comparabilidade entre os sistemas de manejo avaliados.

A análise estatística iniciou-se com a caracterização descritiva dos dados, por meio de medidas de posição e dispersão, tais como médias, desvios-padrão e coeficientes de variação, conforme recomendações clássicas de Bussab & Morettin (2017). A verificação dos pressupostos da análise inferencial foi conduzida pelo teste de Shapiro–Wilk, para avaliar a normalidade das distribuições, e pelo teste de Levene, para examinar a homogeneidade das variâncias. Atendidos esses pressupostos, utilizou-se ANOVA de uma via para comparar os sistemas de manejo, seguida do Teste de Tukey para realizar as comparações múltiplas entre as médias.

Nos casos em que os dados não atenderam às exigências de normalidade ou homocedasticidade, recorreu-se ao teste não paramétrico de Mann-Whitney U, adequado para comparações entre dois grupos independentes e amplamente empregado em estudos com distribuição assimétrica (SIEGEL & CASTELLAN, 1988). Esse mesmo teste foi aplicado às variáveis ordinais provenientes das escalas *Likert*, respeitando a natureza dos dados.

Para avaliar a magnitude das diferenças observadas entre os manejos, calculou-se o tamanho de efeito de Cohen (d), possibilitando estimar a relevância prática dos resultados além da significância estatística (Cohen, 1988). Em variáveis com distribuição marcadamente assimétrica, empregou-se o coeficiente r de Rosenthal como medida alternativa de efeito, assegurando maior precisão interpretativa.

A integração entre as dimensões qualitativa e quantitativa foi operacionalizada mediante a construção de dois índices sintéticos. O primeiro, denominado *Soil Quality Index (SQI)*, baseou-se na padronização dos indicadores físicos, químicos e biológicos por meio do *z-score* e na subsequente combinação desses valores em médias ponderadas, seguindo metodologia adaptada de Karlen et al. (1997). O índice geral pode ser expresso conforme a Equação 1:

$$SQI_{Total} = \frac{SQI_{Físico} + SQI_{Químico} + SQI_{Biológico}}{3} \quad (1)$$

Em que, cada indicador, densidade, porosidade, matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica, respiração basal, dentre outros, foi padronizado individualmente, agrupado em domínios e posteriormente combinado, conforme sintetizado nas Equações 2, 3 e 4:

$$SQI_{Físico} = média(z - densidade* - 1; z - porosidade) \quad (2)$$

$$SQI_{Químico} = média(z - MO; z - pH; z - CTC) \quad (3)$$

$$SQI_{Biológico} = média(z - respiração basal) \quad (4)$$

A segunda métrica elaborada, o Índice de Percepção (IPER), buscou sintetizar a avaliação subjetiva dos agricultores acerca da qualidade do solo. O índice resultou da combinação entre as médias normalizadas das escalas *Likert* e a frequência de códigos positivos extraídos das entrevistas, sendo reescalado para um intervalo de 0 a 100. Esse procedimento reflete uma perspectiva híbrida, integrando percepções relacionadas à compactação, infiltração, erosão, necessidade de correção química e estabilidade produtiva, bem como menções explícitas dos agricultores sobre melhorias no

solo (ex.: “o solo está mais fofo”, “a infiltração melhorou”, “a erosão diminuiu”). O cálculo do IPER é apresentado na Equação 5:

$$IPER = 100 * \frac{\text{Média dos Likert } 0 - 1 + \text{Freq. de Códigos Positivos}}{2} \quad (5)$$

Os valores mais elevados do IPER indicam percepções mais favoráveis quanto à qualidade e sustentabilidade do solo. A relação entre os dois índices foi investigada pelo coeficiente de correlação de Spearman (ρ), cuja interpretação seguiu a classificação proposta por Conover (1999), distinguindo correlações fracas ($\rho < 0,3$), moderadas ($0,3 \leq \rho \leq 0,6$) e fortes ($\rho > 0,6$). A robustez das análises foi assegurada pela verificação rigorosa dos pressupostos da ANOVA (normalidade e homocedasticidade dos resíduos) pela utilização de medidas de tamanho de efeito, como o d de Cohen, e pela aplicação do procedimento de Benjamini–Hochberg (1995) quando necessário, a fim de controlar o erro associado a comparações múltiplas.

A rotina estatística foi executada no software Minitab[®], com documentação integral das planilhas, modelos, outputs e scripts utilizados, garantindo plena rastreabilidade e replicabilidade das análises (MINITAB, 2022). Todas as etapas do estudo observaram as diretrizes éticas para pesquisas envolvendo seres humanos. Os agricultores participantes receberam e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE), em conformidade com a Resolução nº 510/2016 do Conselho Nacional de Saúde (Brasil, 2016). As informações obtidas foram tratadas de forma anônima e confidencial, preservando a identidade dos participantes e assegurando o uso responsável dos dados. Ao final da pesquisa, os resultados foram devolvidos aos agricultores em linguagem acessível, garantindo retorno social imediato e reforçando o

compromisso da investigação com a transparência e o respeito às comunidades envolvidas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise comparativa da qualidade do solo nos sistemas de horticultura familiar revelou contrastes marcantes entre os manejos conservacionista e convencional, os quais se expressaram de forma consistente nos indicadores físicos, químicos e biológicos avaliados. As diferenças observadas nos boxplots de densidade, porosidade, matéria orgânica e respiração basal demonstram não apenas a influência direta das práticas agrícolas sobre a estrutura e funcionamento do solo, mas também a convergência entre as evidências laboratoriais e a percepção dos agricultores participantes (Gráfico 1).

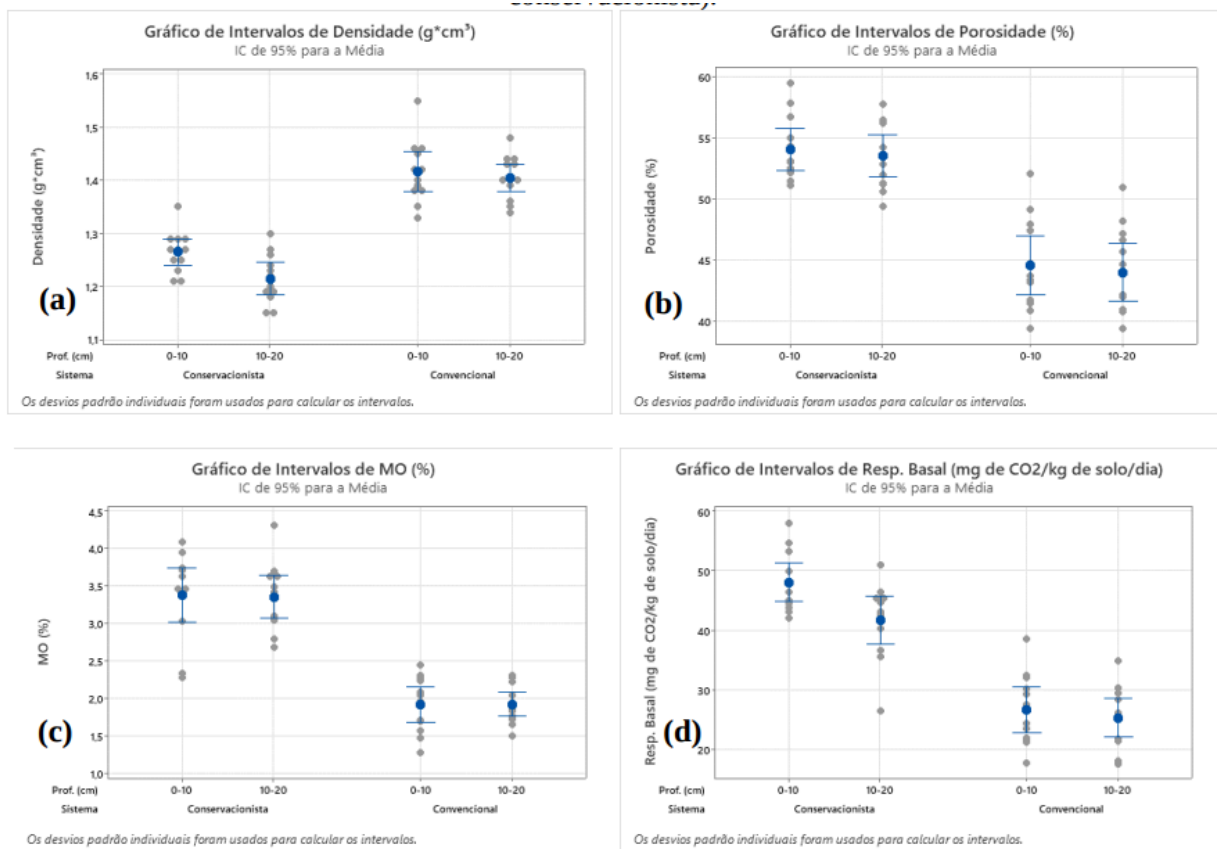
A densidade do solo apresentou-se significativamente mais baixa no sistema conservacionista, em ambas as profundidades avaliadas. Este resultado, que reflete maior porosidade e menor grau de compactação, está diretamente relacionado à adoção de práticas como adubação orgânica, cobertura do solo e rotação de culturas. Segundo Lal (2015), a manutenção de densidades inferiores a $1,30 \text{ g/cm}^3$ em solos tropicais é crucial para o crescimento radicular e a infiltração de água. No sistema convencional, entretanto, valores superiores a $1,40 \text{ g/cm}^3$ indicam uma condição limitante, coerente com o histórico de preparo intensivo e baixa incorporação de resíduos orgânicos, práticas que induzem a degradação estrutural (Gráfico 1a).

Essa interpretação é corroborada pelos dados de porosidade, que revelaram percentuais superiores a 53% no sistema conservacionista,

contrastando com valores inferiores a 45% no convencional. A porosidade total do solo é reconhecida como um dos atributos mais sensíveis da qualidade estrutural, pois regula processos fundamentais como infiltração, aeração e retenção hídrica (DORAN & PARKIN, 1994). Assim, os resultados obtidos sugerem que o manejo conservacionista não apenas melhora a disponibilidade de água às plantas, mas também contribui para a mitigação da erosão, aspecto de grande relevância em áreas de horticultura intensiva no Cerrado (Gráfico 1b).

No âmbito químico, a matéria orgânica constituiu o indicador mais expressivo. Em sistemas conservacionistas, seu teor médio foi aproximadamente 75% superior ao verificado nos convencionais, refletindo o aporte contínuo de compostos orgânicos e a menor oxidação de carbono em razão do não revolvimento. A literatura aponta que a matéria orgânica desempenha papel central na sustentabilidade produtiva, pois além de ser fonte de nutrientes, aumenta a capacidade de troca catiônica e atua no tamponamento do pH (MARCHI et al., 2008). Portanto, a elevação da matéria orgânica nos sistemas conservacionistas observada neste estudo, representa melhoria da fertilidade do solo, como também a base para maior resiliência e estabilidade de longo prazo (Gráfico 1c).

Gráfico 1: Densidade de solo (a), Porosidade (b), Matéria Orgânica (c), Respiração Basal (d) em duas diferentes profundidades de solo (00-10 cm; 10-20 cm) e dois diferentes sistemas de produção (convencional e conservacionista).



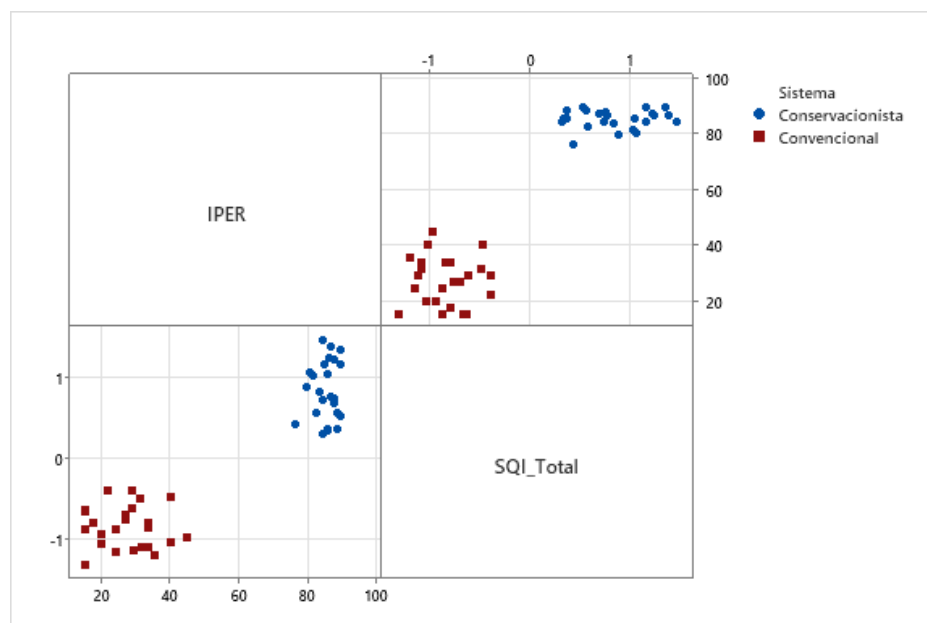
Fonte: Elaborado pelos autores.

Do ponto de vista biológico, a respiração basal evidenciou a vitalidade microbiana dos sistemas avaliados. Os valores próximos a $45\text{mg de CO}_2/\text{kg de solo}/\text{dia}$ no conservacionista contrastaram com apenas 25mg no convencional. Esse resultado indica maior atividade de microrganismos decompositores em solos que recebem matéria orgânica regularmente, criando um ciclo virtuoso entre aporte de resíduos, aumento da atividade biológica e manutenção da fertilidade. Nesse ponto, Anderson e Domsch (1990) ressaltam que a respiração basal constitui um indicador direto da mineralização e, portanto, do potencial do solo em sustentar a produção agrícola. Nesse sentido, a atividade biológica intensificada nos sistemas conservacionistas confirma a sua maior capacidade de autorregulação e resiliência ecológica (Gráfico 1d).

A síntese dos indicadores físicos, químicos e biológicos por meio do Soil Quality Index (SQI) revelou contraste marcante entre os sistemas avaliados. O manejo conservacionista apresentou média positiva em

torno de +0,8 *z-score*, refletindo condições estruturais adequadas, fertilidade química equilibrada e elevada atividade microbiana. Já o sistema convencional concentrou-se em valores negativos ($\approx -0,8$), indicando degradação em múltiplos domínios do solo e confirmando o comportamento já observado nos atributos isolados (Gráfico 2).

Gráfico 2: Relação entre o Índice de Qualidade do Solo (SQI Total) e o Índice de Percepção dos Agricultores (IPER) em sistemas de horticultura familiar sob manejo conservacionista e convencional.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Essa diferenciação técnica encontrou respaldo nas avaliações subjetivas, expressas pelo Índice de Percepção (IPER): agricultores que praticam manejo conservacionista atribuíram notas médias superiores a 85 pontos, associadas à maior infiltração de água, redução de erosão e maior estabilidade produtiva, enquanto os vinculados ao sistema convencional atribuíram apenas 27 pontos, evidenciando percepção negativa quanto à compactação, necessidade de correções químicas e perda de produtividade. A associação entre ambos os índices foi estatisticamente robusta

($p \approx 0,7$; $p < 0,01$), demonstrando que o incremento de qualidade medido em laboratório acompanha de forma consistente o saber empírico dos agricultores. Tal convergência reforça a importância metodológica de integrar métricas objetivas e percepções locais no monitoramento da qualidade do solo, ampliando a capacidade diagnóstica e a legitimidade dos resultados perante a comunidade agrícola.

Há de se ressaltar a forte convergência entre SQI e IPER evidenciando que melhorias na qualidade física, química e biológica do solo foram efetivamente percebidas no campo, traduzindo-se em maior confiança dos agricultores na estabilidade e sustentabilidade de suas lavouras. Tal resultado é particularmente relevante para a horticultura familiar, pois reforça que indicadores técnicos de qualidade do solo não se restringem ao ambiente acadêmico ou laboratorial, mas encontram ressonância no saber local. Essa interseção entre ciência e prática consolida um quadro de evidências robusto, sugerindo que políticas de fomento ao manejo conservacionista podem ser legitimadas tanto pela mensuração científica quanto pela validação social junto aos agricultores.

A interpretação prática dos resultados evidencia que a adoção de práticas conservacionistas promove ganhos consistentes em propriedades hortícolas familiares, refletindo-se na maior capacidade produtiva e na estabilidade dos sistemas frente a variações climáticas e sazonais. A melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo reduz a necessidade de insumos corretivos externos, criando um ambiente de cultivo mais eficiente e economicamente viável. Esses efeitos positivos não se restringem ao desempenho imediato da lavoura, mas configuram-se como elementos estruturantes da sustentabilidade produtiva regional,

uma vez que favorecem a manutenção da fertilidade, a conservação da água no perfil e a preservação da atividade biológica essencial ao equilíbrio do solo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos permitiram constatar, de forma abrangente, que o manejo conservacionista apresenta desempenho superior em relação ao convencional nos sistemas de horticultura familiar do Triângulo Mineiro. A análise integrada dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo revelou que a menor densidade e a maior porosidade, combinadas ao acúmulo de matéria orgânica, ao equilíbrio do pH, ao incremento da capacidade de troca catiônica e à intensificação da atividade microbiana, configuram um ambiente edáfico mais favorável ao desenvolvimento das culturas. Esse conjunto de fatores se expressou em valores positivos do Soil Quality Index (SQI), confirmando a funcionalidade ecológica e produtiva do solo sob manejo conservacionista.

Em contrapartida, o sistema convencional manteve escores negativos de SQI, reflexo da degradação estrutural e funcional associada ao preparo intensivo e à baixa reposição de matéria orgânica, elementos que comprometem a sustentabilidade a médio e longo prazo. A análise quali-quantitativa mostrou forte convergência entre a mensuração técnico-laboratorial (SQI) e as percepções dos agricultores (IPER), sustentando a hipótese de pertinência dos indicadores como ferramentas de diagnóstico.

Do ponto de vista da aplicação da pesquisa, os resultados sustentam a recomendação de práticas conservacionistas (adubação orgânica, cobertura vegetal e rotação) como eixo de manejo para sistemas

hortícolas familiares. Tais práticas reduzem a dependência de insumos corretivos, elevam a resiliência a variações climáticas e estabilizam a produção ao longo dos ciclos. A adoção sistemática de rotinas de monitoramento com painéis mínimos de indicadores e a utilização de índices integradores (SQI e IPER) configuram um caminho factível para orientar assistência técnica, pesquisa participativa e decisões de manejo nas propriedades.

Agradecimentos

À PROPEPE (UNIUBE). À FAPEMIG pelo apoio à este projeto de pesquisa (PIBIC-FAPEMIG 2025/36).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTIERI, Miguel A.; NICHOLLS, Clara Ines. Agroecology and the emergence of a post COVID-19 agriculture. **Agriculture and Human Values**, v. 37, n. 3, p. 525-526, 2020.

ALVAREZ-SÁNCHEZ, María Edna; MALDONADO-TORRES, Ranferi; NÁJERA-ROSAS, Cinthia; CRISTÓBAL-ACEVEDO, David. Manejo agroecológico para la restauración de la calidad del suelo. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, v. 11, n. 4, p. 741-752, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2462>. Acesso em: 12 dez. 2025.

ANDERSON, Traute-Heidi; DOMSCH, Klaus H. Application of eco-physiological quotients (qCO₂ and qD) on microbial biomasses from soils of different cropping histories. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 22, n. 2, p. 251-255, 1990. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(90\)90094-G](https://doi.org/10.1016/0038-0717(90)90094-G). Acesso em: 15 dez. 2025.

BARRETO, Matheus Sampaio C. et al. Effects of horticulture on soil organic matter properties in highly weathered tropical soils. **Soil and Tillage Research**, v. 213, 105156, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105156>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BEDOLLA-RIVERA, Héctor Iván; et al. Analyzing the Impact of Intensive Agriculture on Soil Quality: A Systematic Review and Global Meta-Analysis of Quality Indexes. **Agronomy**, v. 13, n. 8, 2166, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13082166>. Acesso em: 30 jan. 2026.

BENJAMINI, Yosef; HOCHBERG, Yoav. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. **Journal of the Royal Statistical Society: Series B**, London, v. 57, n. 1, p. 289-300, 1995.

BRASIL. Conselho Nacional de Saúde. Resolução nº 510, de 7 de abril de 2016. Dispõe sobre as normas aplicáveis a pesquisas em Ciências Humanas e Sociais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 maio 2016. Seção 1, p. 44-46.

BÜNEMANN, Else K. et al. Soil quality: a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>. Acesso em: 05 fev. 2026.

BUSSAB, Wilton de Oliveira; MORETTIN, Pedro Alberto. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. 2. ed. Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1988.

CONOVER, William J. **Practical nonparametric statistics**. 3. ed. New York: Wiley, 1999.

DONAGEMA, Gustavo Kyoshi; et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

DORAN, John W.; PARKIN, Timothy B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, John W. et al. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21.

KARLEN, David L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KUMAR, Adyant; SINGH, Birendra. Evaluating the Impact of Conservation Agriculture Practices on Soil Quality and Long-Term Yield Stability. **Plant Science Review**, v. 4, n. 2, p. 25-29, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.51470/PSR.2023.04.02.25>. Acesso em: 30 nov. 2025.

LAL, Rattan. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, Basel, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015.

LOPES, Carlos Alberto; PEDROSO, Maria Thereza Macedo. **Sustentabilidade e horticultura no Brasil: da retórica à prática**. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

MARCHI, Edilene Carvalho Santos; et al. Efeito da adubação orgânica sobre as frações de carbono de solos cultivados com alface americana. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 6, p. 1760-1766, nov./dez. 2008.

MINITAB. **Minitab Statistical Software**. [S. l.]: Minitab, 2022.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SHARMA, Rishikesh; RALLAPALLI, Srinivas; MAGNER, Joe. Optimizing water-efficient agriculture: evaluating the sustainability of soil management and irrigation synergies using fuzzy extent analysis. **Scientific Reports**, v. 15, 29382, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15426-6>. Acesso em: 30 jan. 2026.

SIEGEL, Sidney; CASTELLAN, N. John. **Nonparametric statistics for the behavioral sciences**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

TOLEDO, Víctor M.; BARRERA-BASSOLS, Narciso. **La memoria biocultural: la importancia ecológica de las sabidurías tradicionales**. Barcelona: Icaria, 2008.

VANCE, E. D.; BROOKES, P. C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987.

WU, Baojian et al. Soil organic carbon, carbon fractions, and microbial community under various organic amendments. **Scientific Reports**, v. 14, 25431, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-75771-w>. Acesso em: 30 nov. 2025.

¹ Discente do Curso de Agronomia da Universidade de Uberaba
Campus Uberlândia. E-mail: analeticiag33@gmail.com

² Docente do Curso de Agronomia da Universidade de Uberaba
Campus Uberlândia. E-mail: fabricio.almeida@uniube.br

³ Docente do Curso de Agronomia da Universidade de Uberaba
Campus Uberaba. E-mail: harielly.marques@uniube.br